

ВВЕДЕНИЕ

При разработке новых конструкций машин и приборов, проектировании технологических процессов, выборе измерительных средств и методов измерений возникает необходимость в проведении размерного анализа, заключающегося в установлении правильного соотношения взаимосвязанных размеров деталей и расчете допусков этих размеров.

Размерный анализ является одним из основных этапов конструирования, способствующим технологичности конструкций и, следовательно, от качества его проведения во многом зависит успешное решение главной производственной задачи — обеспечение высокого качества при одновременном снижении трудоемкости и себестоимости изделий.

Установление правильного соотношения между взаимосвязанными размерами и назначение на них требуемых допусков при производстве размерного анализа основаны на использовании теории размерных цепей.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1 Основные понятия, термины, определения и обозначения

Рассматриваемые термины и определения, принятые обозначения, а также методы расчета размерных цепей регламентированы РД 50-635-87 «Методические указания. Цепи размерные. Основные понятия. Методы расчета линейных и угловых цепей».

Размерная цепь – это совокупность взаимосвязанных размеров, образующих замкнутый контур и определяющих взаимное положение поверхностей (осей) одной детали или нескольких деталей, входящих в узел.

Замкнутость размерной цепи обуславливает то, что ни один из входящих в нее размеров не может назначаться произвольно, независимо от остальных. Это значит, что значение и точность каждого из размеров размерной цепи зависит от значения и точности остальных.

Согласно стандартной классификации размерные цепи делятся на:

а) конструкторские, технологические и измерительные (в зависимости от решения задачи обеспечения точности соответственно при конструировании, изготовлении изделий, при измерении величин, характеризующих точность изделий);

б) подетальные и сборочные (определяющие точность относительного положения поверхностей одной детали или нескольких деталей, входящих в сборочную единицу);

в) плоские (с произвольным расположением звеньев в одной или нескольких параллельных плоскостях) и пространственные (с расположением звеньев в пространстве).

В частном случае плоские размерные цепи могут иметь параллельно расположенные друг другу звенья. Такие размерные цепи называют линейными.

В курсе «*Нормирование точности и технические измерения*» рассматриваются только плоские размерные цепи с параллельными звеньями.

Размеры, входящие в размерную цепь, называются звеньями. Любая размерная цепь состоит из одного исходного (замыкающего) звена и нескольких (не менее двух) составляющих звеньев.

Исходное (замыкающее) звено — это звено, возникающее в результате постановки задачи при проектировании, для решения которой используется размерная цепь.

Понятие исходного звена используется только при проектных расчетах размерных цепей. В процессе обработки детали или при сборке узла исходное звено, как правило, получается последним, замыкая размерную цепь. В этих случаях и при построении геометрических схем размерных цепей исходное звено называют замыкающим.

Остальные звенья размерной цепи являются составляющими. По отношению к замыкающему звену составляющие звенья размерной цепи делятся на увеличивающие и уменьшающие.

Увеличивающие звенья — это те звенья, с увеличением которых размер замыкающего звена увеличивается.

Уменьшающие звенья — это звенья, с увеличением которых размер замыкающего звена уменьшается.

Все звенья размерной цепи принято обозначать одной из прописных букв русского алфавита. При этом замыкающее звено обозначают прописной буквой с индексом Δ , а составляющие – той же буквой с цифровыми индексами, определяющими порядок расположения звеньев в цепи.

Например: A_{Δ} , A_1 , A_2 , A_3 , ...; B_{Δ} , B_1 , B_2 , B_3 , ... и т.д.

Стандартным обозначением увеличивающих и уменьшающих звеньев в расчетных формулах и на геометрических схемах размерных цепей является указание стрелкой, помещаемой над буквенным обозначением звена. При этом для увеличивающих звеньев принято пра-

вое направление стрелки, а для уменьшающих – левое (рис. 1 а). Однако в справочной и учебной литературе чаще используются другие условные обозначения, наиболее распространенным из которых является указание при буквенном обозначении с цифровыми индексами индексов «ув» и «ум» соответственно для увеличивающих и уменьшающих звеньев (см. рис. 1 б)

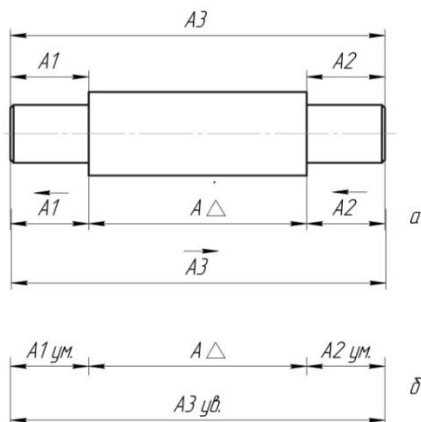


Рис. 1. Схема подетальной размерной цепи

Определение характера составляющих звеньев (их деление на увеличивающие и уменьшающие) осуществляют, используя правило обхода по замкнутому контуру при построении схем размерных цепей. При этом в схеме цепи все увеличивающие звенья располагают в одном ряду, а уменьшающие и вместе с ними замыкающие – в другом.

Построение размерных цепей (особенно сборочных) представляет собой непростую задачу и требует от исполнителей определенных навыков и опыта. Трудности обычно возникают при установлении размерных связей в процессе размерного анализа. В связи с этим следует иметь в виду, что установление размерных связей должно вестись по сборочным базам, которыми являются поверхности касания примыкающих друг к другу деталей узла.

Строя размерную цепь, обход по контуру начинают от замыкающего звена. Двигаясь в том или другом направлении от замыкающего звена, последовательно мысленно увеличивают размеры, заключенные между сборочными базами примыкающих деталей, определяя тем самым составляющие звенья размерной цепи.

Если мысленно увеличенный размер (при неизменных остальных) изменяет размер замыкающего звена (увеличивает его или уменьшает), то данный размер включают в размерную цепь соответственно в качестве увеличивающего или уменьшающего составляющего звена. Такой порядок последовательного перемещения от размера одной детали к размеру другой продолжается до получения замкнутого контура.

При составлении сборочных размерных цепей требуется соблюдение принципа кратчайшей размерной цепи. Этот принцип заключается в том, что в сборочную размерную цепь в качестве составляющих звеньев могут входить только по одному размеру тех или иных деталей узла. При этом, если на чертеже узла размер детали, необходимый для включения в цепь, отдельно не указан, его величина должна быть определена через другие размеры данной детали.

1.2 Задачи, решаемые с помощью размерных цепей, и методы их расчета

Использование теории размерных цепей позволяет решать следующие конструкторские, технологические и метрологические задачи.

- установление геометрических и кинематических связей между размерами деталей, расчет номинальных значений, допусков и предельных отклонений размеров;

- расчет норм точности и разработка технических условий на машины, приборы и их составные части;

- анализ правильности простановки размеров и предельных отклонений на рабочих чертежах деталей;

- расчет межоперационных размеров, припусков и допусков, пересчет конструктивных размеров на технологические;

- обоснование последовательности технологических операций при изготовлении и сборке изделий;

- обоснование и расчет требуемой точности приспособлений;

- выбор средств и методов измерений, расчет достижимой точности измерений.

Расчетом размерной цепи называют определение предельных размеров, а следовательно, допусков и предельных отклонений всех ее звеньев.

Для решения вышеперечисленных задач применяются следующие методы расчета:

а) Метод полной взаимозаменяемости (метод расчета на максимум-минимум), при котором требуемая точность замыкающего звена

размерной цепи обеспечивается даже в тех случаях, когда все составляющие ее звенья имеют предельно допустимые размеры. Любое из звеньев цепи может быть заменено звеном такого же типа без подбора и без изменения его величины путем дополнительной обработки.

б) Вероятностный метод, учитывающий законы рассеивания размеров деталей и случайный характер их сочетания в процессе сборки. Его относят к методам ограниченной взаимозаменяемости. Однако использование вероятностного расчета размерных цепей в условиях массового и серийного производств обеспечивает почти полную взаимозаменяемость, так как вероятность выхода размера замыкающего звена за границы установленного допуска обычно не превышает 0,27%.

в) Метод групповой взаимозаменяемости (селективной сборки), при котором точность замыкающего звена размерной цепи достигается путем включения в нее составляющих звеньев, принадлежащих одной из групп, на которые они были предварительно рассортированы. Данный метод расчета позволяет значительно повысить точность замыкающего звена без повышения точности обработки составляющих звеньев.

г) Метод регулирования, при котором на составляющие звенья размерной цепи назначаются сравнительно грубые (экономически целесообразные) допуски, а для обеспечения требуемой точности замыкающего звена в размерную цепь вводят компенсирующее звено (или регулирующее устройство). При данном методе расчета точность замыкающего звена обеспечивается путем изменения размера (без снятия стружки) и положения компенсирующего звена.

д) Метод пригонки, который в основном соответствует методу регулирования. В отличие от последнего при использовании метода пригонки необходимая точность замыкающего звена размерной цепи достигается изменением размера компенсирующего звена путем снятия слоя материала.

2 РАСЧЕТ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ

2.1 Порядок расчета линейных размерных цепей методом полной взаимозаменяемости

Номинальные размеры любой линейной размерной цепи связаны уравнением

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^m \overrightarrow{A}_i - \sum_{i=1}^n \overleftarrow{A}_i, \quad (1)$$

где m – число увеличивающих звеньев;

n – число уменьшающих звеньев.

Уравнение (1) носит название основного уравнения размерной цепи или уравнения номиналов. Исходя из основного уравнения размерной цепи, можно записать уравнения для определения предельных размеров замыкающего звена:

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^m \overrightarrow{A}_{i\max} - \sum_{i=1}^n \overleftarrow{A}_{i\min}, \quad (2)$$

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^m \overrightarrow{A}_{i\min} - \sum_{i=1}^n \overleftarrow{A}_{i\max}. \quad (3)$$

Если теперь из уравнения (2) вычтем уравнение (3), получим формулу для определения допуска замыкающего звена:

$$T_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m+n} T_i. \quad (4)$$

И, наконец, произведя почленное вычитание из уравнений (2) и (3) уравнения (1), получим новые уравнения, связывающие предельные отклонения замыкающего и составляющих звеньев размерной цепи:

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{\Delta} = \sum_{i=1}^m \overrightarrow{B}_i - \sum_{i=1}^n \overleftarrow{H}_i \\ H_{\Delta} = \sum_{i=1}^m \overleftarrow{H}_i - \sum_{i=1}^n \overrightarrow{B}_i \end{array} \right\}. \quad (5)$$

В определении номинального размера, допуска и предельных отклонений замыкающего звена по формулам (1), (4) и (5) заключается решение обратной задачи при расчете размерных цепей методом полной взаимозаменяемости. При этом должны быть известны номинальные размеры, допуски и предельные отклонения составляющих звеньев.

Обратная задача относится к проверочному расчету размерной цепи. Ее решением проверяют правильность назначения допусков и предельных отклонений составляющих звеньев, т. е. проверяют правильность решения прямой (проектной) задачи.

Смысл решения прямой задачи заключается в том, что по известным значениям номинального размера, допуска и предельных отклонений замыкающего звена определяются номинальные размеры, допуски и предельные отклонения составляющих звеньев размерной цепи.

При расчете размерной цепи методом полной взаимозаменяемости прямую задачу можно решать двумя путями:

- а) назначением на составляющие звенья равных допусков;
- б) назначением на составляющие звенья допусков одной степени точности.

Решая задачу первым путем, исходят из того, что допуски составляющих звеньев размерной цепи должны быть равными, т. е.

$$T_1 = T_2 = T_3 = \dots = T_{m+n} = T_c. \quad (6)$$

Так как согласно уравнению (4) допуск замыкающего звена должен быть равен сумме допусков составляющих звеньев, для данного случая можно записать, что

$$T_\Delta = T_c (m + n), \quad (7)$$

Откуда требуемое значение среднего допуска

$$T_c = \frac{T_\Delta}{m + n}. \quad (8)$$

Если в числе составляющих звеньев имеются звенья с известными допусками, то формулу (8) можно представить в следующем виде:

$$T_c = \frac{T_\Delta - \sum_{i=1}^k T_{\text{изз}}}{m + n - k}. \quad (9)$$

где k – число составляющих звеньев с известными допусками.

Использование данного пути решения прямой задачи целесообразно при небольшой разнице между размерами составляющих звеньев, т. е. в тех случаях, когда размеры звеньев находятся в границах одного из интервалов размеров, предусмотренных ГОСТ 25346-2013. При значительной же разнице в размерах звеньев решение задачи этим путем неприемлемо.

При решении прямой задачи путем назначения на составляющие звенья допусков одной степени точности условно считают, что изменение допуска линейных размеров при изменении их номинальных значений подчиняется той же закономерности, что и изменение допуска диаметров.

Следовательно, для 5...17-го квалитетов и размеров до 500 мм формула допуска любого из составляющих звеньев размерной цепи имеет следующий вид:

$$T_i = a_i \cdot 0,45 \sqrt[3]{A_{ic}} + 0,001 A_{ic} = a_i \cdot i. \quad (10)$$

Учитывая, что все звенья цепи должны выполняться с одинаковой точностью (по одному качеству), принимают, что

$$a_1 = a_2 = a_3 = \dots = a_{m+n} = a_c. \quad (11)$$

где a_c – число единиц допуска или коэффициент точности размерной цепи.

Тогда допуск замыкающего звена равен

$$T_{\Delta} = a_c \sum_{i=1}^{m+n} i_i, \quad (12)$$

откуда

$$a_c = \frac{T_{\Delta}}{\sum_{i=1}^{m+n} i_i}, \quad (13)$$

Если в числе составляющих звеньев в размерной цепи имеются звенья с заранее установленными (уже известными) допусками, то при определении a_c , эти допуски должны быть учтены. В связи с этим формула (13) приобретает следующий вид:

$$a_c = \frac{T_{\Delta} - \sum_{i=1}^k T_{\text{из}}}{\sum_{i=1}^{m+n-k} i_i}, \quad (14)$$

где k – число звеньев с известными допусками.

При использовании формул (13) и (14) значение единицы допуска i можно выбирать по прил. 1.

Определенное по формуле (13) или (14) значение a_c сравнивают со стандартными значениями числа единиц допуска a (прил. 2), устанавливая таким образом качество, по которому затем, используя прил. 2., назначают допуски размеров составляющих звеньев.

Расчетное значение a_c , как правило, не получается равным ближайшим стандартным значениям a и, следовательно, условие, определяемое формулой (4), после назначения допусков не выдерживается.

Для соблюдения этого условия необходима увязка допусков, которую обычно осуществляют за счет изменения допуска одного из составляющих звеньев цепи – так называемого корректирующего звена. Из числа составляющих звеньев выбирается корректирующее и на него назначается нестандартный допуск. На оставшиеся же звенья (кроме звеньев с известными допусками) допуски назначаются по установленному качеству.

Величину допуска корректирующего звена определяют по формуле

$$T_{\text{кор}} = T_{\Delta} - \sum_{i=1}^{m+n-1} T_i, \quad (15)$$

При выборе корректирующего звена руководствуются следующими соображениями. Если $a_c < a$, по которому выбран квалитет, и, следовательно, на корректирующее звено должен быть установлен более жесткий допуск, то в качестве корректирующего выбирают наиболее простое в изготовлении звено. И наоборот, при $a_c > a$, когда на корректирующее звено может быть назначен более грубый допуск, в качестве его выбирают наиболее сложное в изготовлении звено.

После назначения допусков назначают предельные отклонения размеров составляющих звеньев. При этом на все охватываемые размеры отклонения назначаются как на основное отверстие ($h_i = 0$), на все охватываемые – как на основной вал ($v_i = 0$), а на все другие размеры назначаются симметричные отклонения $\pm \frac{T_i}{2}$.

На корректирующее звено размерной цепи предельные отклонения не назначают, а определяют расчетом. При расчете предельных отклонений корректирующего звена удобно оперировать координатой середины поля допуска. Координата середины поля допуска (среднее отклонение) любого из составляющих звеньев

$$c_i \pm \frac{B_i + H_i}{2}, \quad (16)$$

а его верхнее и нижнее и предельные отклонение соответственно:

$$\begin{cases} B_i = c_i + \frac{T_i}{2} \\ H_i = c_i - \frac{T_i}{2} \end{cases}. \quad (17)$$

Координата середины поля допуска, верхнее и нижнее отклонения замыкающего звена определяют из выражений, аналогичных выражениям (16) и (17).

Координаты середин полей допусков замыкающего и составляющих звеньев связаны зависимостью

$$c_{\Delta} = \sum_{i=1}^m \vec{c}_i - \sum_{i=1}^n \vec{c}_i, \quad (18)$$

Используя данную зависимость, определяют координату середины

поля допуска выбранного корректирующего звена. При этом, если корректирующее звено выбрано из числа увеличивающих звеньев, то координата середины его поля допуска будет равна

$$\bar{c}_{\text{кор}} = \sum_{i=1}^m \bar{c}_i - \sum_{i=1}^n \bar{c}_i + c_{\Delta}, \quad (19)$$

а если из числа уменьшающих, то

$$\bar{c}_{\text{кор}} = \sum_{i=1}^m \bar{c}_i - \sum_{i=1}^{n-1} \bar{c}_i - c_{\Delta}, \quad (20)$$

Далее по формулам (17) определяют предельные отклонения корректирующего звена и по формулам (19) и (20) проверяют правильность расчета размерной цепи. Рекомендуемая последовательность расчета размерной цепи при решении прямой задачи методом полной взаимозаменяемости следующая:

1. Для замыкающего звена, заданного на чертеже узла, выявить составляющие звенья размерной цепи;
2. Построить геометрическую схему размерной цепи и определить характер составляющих звеньев (установить, которые из них являются увеличивающими и уменьшающими);
3. Используя основное уравнение (1), проверить правильность составления размерной цепи;
4. Определить допуск замыкающего звена, после чего по формулам (13) или (14) рассчитать значение коэффициента точности размерной цепи a_c ;
5. Сравнивая a_c с приведенными в прил. 2 стандартными значениями a , установить квалитет и по прил. 3. назначить допуски на размеры составляющих звеньев, предварительно выбрав корректирующее звено;
6. По формуле (15) определить значение допуска корректирующего звена, а на остальные составляющие звенья согласно назначенным допускам установить предельные отклонения;
7. Используя формулу (16), определить значения координат середин полей допусков замыкающего и всех составляющих звеньев, после чего по формулам (19) или (20) рассчитать координату середины поля допуска корректирующего звена;
8. Рассчитать по формулам (17) предельные отклонения корректирующего звена и произвести проверку правильности расчета размерной цепи.

2.2 Пример расчет линейных размерных цепей методом полной взаимозаменяемости

Для сборочной размерной цепи с замыкающим звеном B_{Δ} (рис. 2) решение задачи ведем в соответствии с рекомендуемой последовательностью.

Дано: $B_{\Delta}=2,2,0$.

В заданной размерной цепи замыкающим звеном является зазор, образуемый торцом подшипника и торцом крышки подшипника. Этот зазор необходим для компенсации температурных изменений размеров деталей узла и, следовательно, величина его должна быть выдержана в строго заданных пределах.

Построим размерную цепь, т. е. найдем ее составляющие звенья. Делая обход по контуру от замыкающего звена, установим поверхности касания (сборочные базы) примыкающих деталей, а через них – размерные связи.

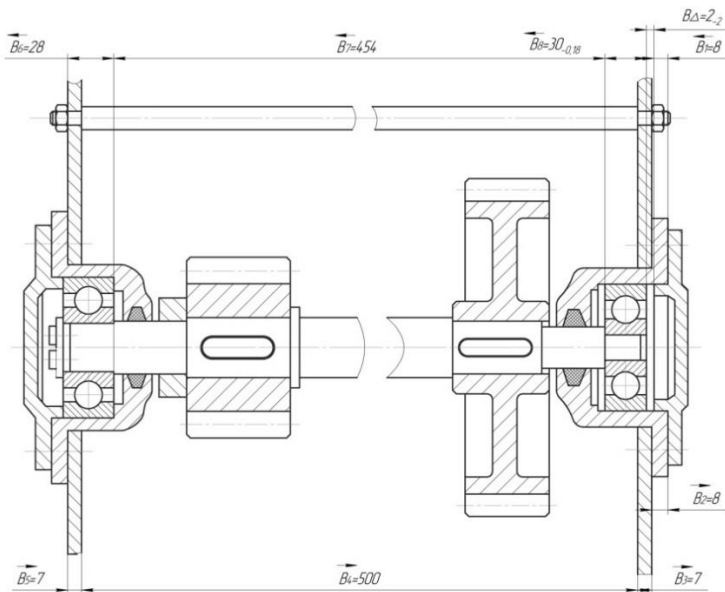


Рис. 2. Схема сборочной размерной цепи

Запишем размерные связи следующим образом:

1. замыкающее звено – крышка подшипника;

2. крышка подшипника – стакан правого подшипника;
3. стакан правого подшипника – корпус;
4. корпус – распорный винт;
5. распорный винт – корпус;
6. корпус – участок стакана подшипника;
7. участок стакана подшипника – участок вала;
8. участок вала – ширина подшипника;
9. ширина подшипника – замыкающее звено.

Размерную цепь составляют размеры между поверхностями касания каждой из указанных деталей:

$$B_1 = 8 \text{ мм}, B_2 = 8 \text{ мм}, B_3 = 7 \text{ мм}, B_4 = 500 \text{ мм}, \\ B_5 = 7 \text{ мм}, B_6 = 28 \text{ мм}, B_7 = 454 \text{ мм}, B_8 = 30_{-0,18} \text{ мм}.$$

Размерная цепь включает восемь составляющих звеньев, из которых звенья B_1, B_6, B_7, B_8 – являются *уменьшающими*, а звенья B_2, B_3, B_4, B_5 – *увеличивающими*.

Геометрическая схема размерной цепи представлена на рис. 2.

Проверим правильность составления размерной цепи, для чего используем формулу (1):

$$B_{\Delta} = (B_2 + B_3 + B_4 + B_5) - (B_1 + B_6 + B_7 + B_8), \\ B_{\Delta} = (8 + 7 + 500 + 7) - (8 + 28 + 454 + 30) = 2 \text{ мм}.$$

Полученное значение номинального размера замыкающего звена соответствует заданному. Следовательно, размерная цепь составлена правильно.

Определяем теперь коэффициент точности размерной цепи, рассчитав предварительно допуск замыкающего звена.

Допуск замыкающего звена:

$$T_{\Delta} = v_{\Delta} - n_{\Delta} = 0 - (-2000) = 2000 \text{ мкм}.$$

Далее рассчитываем коэффициент точности размерной цепи по формуле (14), т.к. в составе размерной цепи имеются звенья с известными допусками (подшипники качения):

В знаменателе под знак суммы должны войти значения единиц допуска размеров звеньев $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7$, которые находим по прил. 1, а вторым членом числителя должен быть допуск монтажной высоты подшипника (звено B_8). Тогда:

$$a_c = \frac{2000 - 180}{0,9 + 0,9 + 0,9 + 3,89 + 0,9 + 1,31 + 3,89} = 143,4 \text{ мкм.}$$

Сопоставляя полученное значение a_c с данными прил. 2, устанавливаем, что оно находится в интервале значений a_c , соответствующих 11-му и 12-му квалитетам ($a_{11} = 100 \text{ мкм}$, $a_{12} = 160 \text{ мкм}$).

В данном случае на составляющие звенья целесообразно назначить допуски по 11-му квалитету и, так как $a_c > a_{11}$, в качестве корректирующего звена выбрать наиболее сложное в изготовлении звено. Примем в качестве корректирующего звена распорный винт – звено $B_4 = 500 \text{ мм}$, а на остальные назначим стандартные допуски.

По прил. 3, имеем следующее:

$$T_1 = 90 \text{ мкм}; T_2 = 90 \text{ мкм}; T_3 = 90 \text{ мкм}; \\ T_5 = 90 \text{ мкм}; T_6 = 130 \text{ мкм}; T_7 = 400 \text{ мкм}.$$

Нестандартный допуск корректирующего звена T_4 находим по формуле (15):

$$T_4 = T_{\Delta} - (T_1 + T_2 + T_3 + T_5 + T_6 + T_7 + T_8), \\ T_4 = 2000 - (90 + 90 + 90 + 90 + 130 + 400 + 180) = 930 \text{ мкм}.$$

Предельные отклонения составляющих звеньев (исключая корректирующее) назначаем, следуя вышеизложенному правилу. Тогда

$$B_1 = 8 \pm 0,045 \text{ мм}; B_2 = 8_{-0,09} \text{ мм}; B_3 = 7_{-0,09} \text{ мм}; \\ B_5 = 7_{-0,09} \text{ мм}; B_6 = 28_{-0,13} \text{ мм}; B_7 = 454_{-0,4} \text{ мм}.$$

Определяем координату середины поля допуска корректирующего звена, определив предварительно значение ее у всех остальных звеньев цепи.

Координаты середины полей допусков замыкающего и составляющих звеньев находим по формуле (16) Имеем:

$$c_{\Delta} = -1 \text{ мм}; c_1 = 0 \text{ мм}; c_2 = -0,045 \text{ мм}; c_3 = -0,045 \text{ мм}; \\ c_5 = -0,045 \text{ мм}; c_6 = -0,065 \text{ мм}; c_7 = -0,2 \text{ мм}; c_8 = -0,09 \text{ мм}.$$

Координату середины поля допуска корректирующего звена находим по формуле (19) Имеем:

$$c_4 = (0 - 0,065 - 0,2 - 0,09) - (-0,045 - 0,045 - 0,045) + (-1) = -1,22 \text{ мм}.$$

Теперь по формуле (17) устанавливаем предельные отклонения звена B_4 :

$$B_4 = -1,22 + \frac{0,93}{2} = -0,755 \text{ мм},$$

$$H_4 = -1,22 - \frac{0,93}{2} = -1,685 \text{ мм}.$$

Таким образом корректирующее звено имеет предельные отклонения:

$$B_4 = 500_{-1,685}^{-0,755}$$

Проверяем правильность произведенных расчетов, для чего воспользуемся уравнениями (5):

$$V_{\Delta} = \sum_{i=1}^m \vec{V}_i - \sum_{i=1}^n \overleftarrow{H}_i = -0,755 - (-0,045 - 0,13 - 0,4 - 0,18) = 0 \text{ мм},$$

$$H_{\Delta} = \sum_{i=1}^m \overrightarrow{H}_i - \sum_{i=1}^n \overleftarrow{V}_i = -0,09 - 0,09 - 1,685 - 0,09 - (0,045) = -2 \text{ мм}$$

Полученные предельные отклонения замыкающего звена соответствуют заданным. Следовательно, размерная цепь рассчитана правильно.

2.3 Порядок расчета линейных размерных цепей вероятностным методом

При расчете сборочных размерных цепей методом полной взаимозаменяемости исходят из того, что даже при самом неблагоприятном сочетании размеров составляющих звеньев (когда в процессе сборки узла все увеличивающиеся звенья окажутся максимальными, а уменьшающиеся – минимальными) точность замыкающего звена будет обеспечена, т. е. его размер будет находиться в пределах установленного допуска.

Это является главным преимуществом метода. Полная (абсолютная) взаимозаменяемость позволяет упрощать и точно нормировать процессы сборки, осуществлять их полную механизацию и автоматизацию, способствует созданию условий для широкой специализации и кооперирования производств.

Но при всем этом весьма часто на размеры составляющих звеньев приходится назначать необоснованно жесткие допуски, резко увеличивающие стоимость изготовления деталей. Данное обстоятельство ограничивает область использования метода.

Метод полной взаимозаменяемости используют главным образом при ориентировочных расчетах допусков звеньев, а также при расчете

размерных цепей невысокой точности, т. е. размерных цепей, замыкающие звенья которых имеют сравнительно грубые допуски.

Для большинства случаев использования несостоятельность метода полной взаимозаменяемости обосновывается тем, что вероятность самого неблагоприятного сочетания размеров звеньев в цепи даже очень крупных партий однотипных изделий весьма мала.

Для многозвенных сборочных цепей (шесть и более составляющих звеньев) вероятность такого сочетания практически равна нулю. Поэтому в практике проведения размерного анализа для расчета размерных цепей (особенно цепей высокой точности) применяют методы ограниченной взаимозаменяемости и в первую очередь вероятностный метод, основанный на базе основных положений теории вероятностей.

Использование вероятностного метода расчета позволяет значительно увеличивать допуски размеров звеньев (для многозвенных цепей – в два и более раз.

Из-за отсутствия полной взаимозаменяемости, некоторый процент изделий не будет собираться и потребуются замена или дополнительная обработка части деталей. Однако этот процент бывает настолько мал (обычно не более 0,27 % для условий массового и крупносерийного производств), что затраты на дополнительную обработку отдельных деталей с избытком окупаются экономией, получаемой от снижения трудоемкости изготовления деталей за счет расширения допусков на их размеры.

При выводе расчетных зависимостей исходят из того, что в процессе изготовления деталей происходит рассеивание их размеров. В условиях массового и крупносерийного производств рассеивание размеров деталей, в том числе и размеров, входящих в размерные цепи, обычно подчиняется нормальному закону (закону Гаусса).

Исходя из этого на основании рис. 3 для любого из составляющих звеньев размерной цепи можем записать:

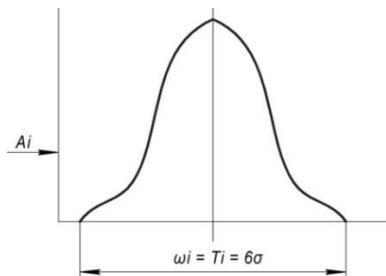


Рис. 3. Схема поддетальной размерной цепи

$$T_i = 6\sigma_1 \text{ или } \sigma_1 = \frac{1}{6T_i}, \quad (21)$$

и аналогично для замыкающего звена

$$T_\Delta = 6\sigma_\Delta \text{ или } \sigma_\Delta = \frac{1}{6T_\Delta}, \quad (22)$$

Рассматривая размер замыкающего звена как сложное случайное событие, зависящее от совокупности простых случайных событий (размеров составляющих звеньев), и, применив теорему о суммировании дисперсий, можем записать выражение для определения среднеквадратического отклонения размера замыкающего звена:

$$\sigma_\Delta = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_{m+n}^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m+n} \sigma_i^2}. \quad (23)$$

Подставив теперь в это выражение значения σ_i и σ_Δ получим формулу, связывающую допуски замыкающего и составляющих звеньев:

$$T_\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^{m+n} T_i^2}. \quad (24)$$

В практике часто бывает так, что в результате совместного воздействия случайных и систематических погрешностей диапазон рассеивания не равен допуску, а центр группирования кривых рассеивания не совпадает с координатой середины поля допуска, т. е. действительное рассеивание размеров звеньев отклоняется от нормального закона или подчиняется другим законам. В таких случаях в формуле (24) вводятся соответствующие поправки.

При любом законе рассеивания размеров звеньев в формулу (24) вводится поправка λ , которая носит название коэффициента относительного рассеивания. Этот коэффициент является средним относительным квадратичным отклонением и учитывает неравенство диапазона рассеивания с допуском размеров звеньев. При диапазоне рассеивания, равном допуску ($\omega_i = T_i$),

$$\lambda_i = \frac{2\sigma_1}{T_1} \text{ или } \sigma_1 = \frac{1}{2}\lambda_1 T_1. \quad (25)$$

аналогично для замыкающего звена

$$\lambda_\Delta = \frac{2\sigma_\Delta}{T_\Delta} \text{ или } \sigma_\Delta = \frac{1}{2}\lambda_\Delta T_\Delta. \quad (26)$$

Подставив значения σ_i и σ_Δ в выражение (23), получим новую формулу для определения допуска замыкающего звена:

$$T_\Delta = \frac{1}{\lambda_\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m+n} \lambda_i^2 T_i^2} . \quad (27)$$

Значения коэффициентов λ_i и λ_Δ для различных законов рассеивания размеров различны. Так, для нормального закона $\lambda_i = \lambda = 1/3$, для закона равнобедренного треугольника (Симпсона) $\lambda_i = \lambda = 1/\sqrt{6}$, а для закона равной вероятности или в том случае, если о законе рассеивания размеров звеньев ничего не известно $\lambda_i = \lambda_\Delta = 1/\sqrt{3}$.

Произведем в формуле (27) замену отношения $\frac{1}{\lambda_\Delta}$ на t_Δ .

Тогда окончательно будем иметь следующее:

$$T_\Delta = t_\Delta \sqrt{\sum_{i=1}^{m+n} \lambda_i^2 T_i^2} . \quad (28)$$

Коэффициент t_Δ называют коэффициентом риска. Его величина зависит от принимаемого при расчетах процента риска выхода за установленные пределы размеров замыкающего звена (табл. 1). Для процента риска, равного 0,27 %, $t_\Delta = 3$.

Таблица 1. Значение коэффициента риска t_Δ при различных значениях процента риска P

$P, \%$	0,01	0,05	0,1	0,27	0,5	1	2	3	5	10	32
t_Δ	3,89	3,48	3,29	3	2,81	2,57	2,32	2,17	1,96	1,65	1

В формулу (18), связывающую координату середины поля допуска замыкающего звена с этим же параметром составляющих звеньев размерной цепи, вводится поправка в виде коэффициента a . Коэффициент a учитывает величину несовпадения центра группирования кривых рассеивания с координатой середины поля допуска размеров звеньев (рис. 4) и называется, в связи с этим, коэффициентом относительной асимметрии.

Согласно схеме, изображенной на рис. 4, значение этого коэффициента для любого из составляющих звеньев размерной цепи определяется по формуле

$$a_i = \frac{2(M_i - c_i)}{T_i} . \quad (29)$$

Отсюда

$$M_i = c_i + a_i \frac{T_i}{2}, \quad (30)$$

где M_i – координата центра группирования размеров i -го составляющего звена.

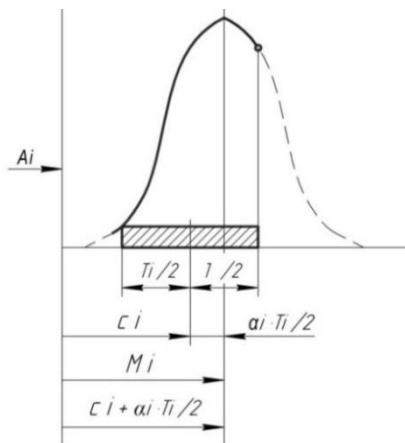


Рис. 4. Схема к определению коэффициента относительной асимметрии

Аналогично можем выразить и координату центра группирования размеров замыкающего звена:

$$M_{\Delta} = c_{\Delta} + a_{\Delta} \frac{T_{\Delta}}{2}, \quad (31)$$

При совпадении центра группирования кривых рассеивания с координатой середины поля допуска размеров звеньев справедливо равенство

$$M_{\Delta} = \sum_{i=1}^m \bar{M}_i^2 - \sum_{i=1}^n \bar{M}_i^2. \quad (32)$$

Подставив в это равенство значения M_i и M_{Δ} , получим новую формулу для определения координаты середины поля допуска замыкающего звена:

$$c_{\Delta} = \sum_{i=1}^m \left(\bar{c}_i + \bar{a}_i \cdot \frac{\bar{T}_i}{2} \right) - \sum_{i=1}^n \left(\bar{c}_i + \bar{a}_i \cdot \frac{\bar{T}_i}{2} \right) - a_{\Delta} \cdot \frac{T_{\Delta}}{2}. \quad (33)$$

Верхнее и нижнее предельные отклонения замыкающего звена

определяются по формулам соответственно

$$\begin{cases} B_{\Delta} = c_{\Delta} + \frac{T_{\Delta}}{2} \\ H_{\Delta} = c_{\Delta} - \frac{T_{\Delta}}{2} \end{cases} \quad (34)$$

С использованием формул (1), (28), (33) и (34) решается обратная задача при проверочных расчетах размерных цепей вероятностным методом.

Решение прямой (проектной) задачи методически выполняется в основном так, как и при расчетах, методом полной взаимозаменяемости.

Для назначения на составляющие звенья размерной цепи равных допусков (что обычно делается при ориентировочных расчетах) по величине допуска замыкающего звена определяют значение среднего допуска составляющих, пользуясь одним из уравнений:

$$T_c = \frac{T_{\Delta}}{t_{\Delta} \lambda_c \sqrt{m+n}}, \quad (35)$$

или при наличии в составе цепи звеньев с известными допусками

$$T_c = \frac{T_{\Delta} - \sum_{i=1}^k T_{\text{из}i}}{t_{\Delta} \lambda_c \sqrt{m+n-k}}, \quad (36)$$

где k – число составляющих звеньев с известными допусками;

λ_c – среднее значение коэффициента относительного рассеивания размеров составляющих звеньев.

Если на размеры составляющих звеньев должны быть назначены допуски одной степени точности (одного качества) то, как и при расчете методом точной взаимозаменяемости, предварительно определяют среднюю величину коэффициента точности размерной цепи a_c по формулам:

$$a_c = \frac{T_{\Delta}}{t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m+n} \lambda_c^2 t_c^2}}, \quad (37)$$

или

$$a_c = \sqrt{\frac{T_{\Delta}^2 - t_{\Delta}^2 \sum_{i=1}^{m+n} (\lambda_i^2 T_{\text{из}i}^2)}{t_{\Delta}^2 \sum_{i=1}^{m+n-k} (\lambda_i^2 t_{\text{из}i}^2)}}, \quad (38)$$

при наличии в цепи составляющих звеньев с известными допусками.

Сопоставляя полученное значение a_c со стандартными значениями a (см. табл. 2 прил. 1), устанавливают квалитет, по которому затем назначают допуски размеров звеньев. При этом должно выдерживаться условие определяемой формулой (28). Если условие (28) не выдерживается, производят корректировку допусков за счет изменения величины допуска звена, выбранного в качестве корректирующего. Допуск корректирующего звена находят по формуле

$$T_{\text{кор}} = \sqrt{T_{\Delta}^2 - \left(t_{\Delta}^2 \sum_{i=1}^{m+n-1} (\lambda_i^2 T_i^2) \right)}. \quad (39)$$

После назначения допусков устанавливают предельные отклонения и рассчитывают координаты середин полей допусков размеров звеньев, а координату середины поля допуска корректирующего звена определяют затем по одному из двух следующих выражений:

$$\bar{c}_{\text{кор}} = \sum_{i=1}^n \left(\bar{c}_i + \bar{\alpha}_i \cdot \frac{\bar{T}_i}{2} \right) - \sum_{i=1}^{m-1} \left(\bar{c}_i + \bar{\alpha}_i \cdot \frac{\bar{T}_i}{2} \right) + c_{\Delta} + \alpha_{\Delta} \cdot \frac{T_{\Delta}}{2}, \quad (40)$$

если корректирующее звено выбрано из числа увеличивающих звеньев, или

$$\bar{c}_{\text{кор}} = \sum_{i=1}^m \left(\bar{c}_i + \bar{\alpha}_i \cdot \frac{\bar{T}_i}{2} \right) - \sum_{i=1}^{n-1} \left(\bar{c}_i + \bar{\alpha}_i \cdot \frac{\bar{T}_i}{2} \right) - c_{\Delta} - \alpha_{\Delta} \cdot \frac{T_{\Delta}}{2}, \quad (41)$$

если корректирующее звено выбрано из числа уменьшающих звеньев.

Значения коэффициентов относительной асимметрии a_i и a_{Δ} могут быть установлены путем сбора и последующей математической обработки статистических данных о рассеивании действительных размеров звеньев цепи. Но обычно этого не делают, а учитывая то, что в условиях современного крупносерийного и массового производства рассеивание размеров деталей в процессе их механической обработки, как правило, подчиняется нормальному закону или другим симметричным законам (Симпсона, равной вероятности и др.), коэффициенты a_i и a_{Δ} принимают равными нулю. В связи с этим расчетные формулы (40) и (41) упрощаются и принимают вид формул (19) и (20), по одной из которых и определяют координату середины поля допуска корректирующего звена.

Предельные отклонения корректирующего звена находят по формулам (17), после чего производят проверку правильности выполненных расчетов. Проверка правильности расчетов заключается в уточнении значения коэффициента риска t_{Δ} , определяемого из формулы (28), и последующего принятия решения о приемлемости назначенных до-

пусков.

Таким образом, методика и последовательность решения прямой задачи при расчете размерных цепей вероятностным методом в целом остаются теми же, что и при расчете методом полной взаимозаменяемости.

2.4 Пример расчет линейных размерных цепей вероятностным методом

Для сборочной размерной цепи с замыкающим звеном A_{Δ} (рис. 6) решение задачи ведем в соответствии с рекомендуемой последовательностью.

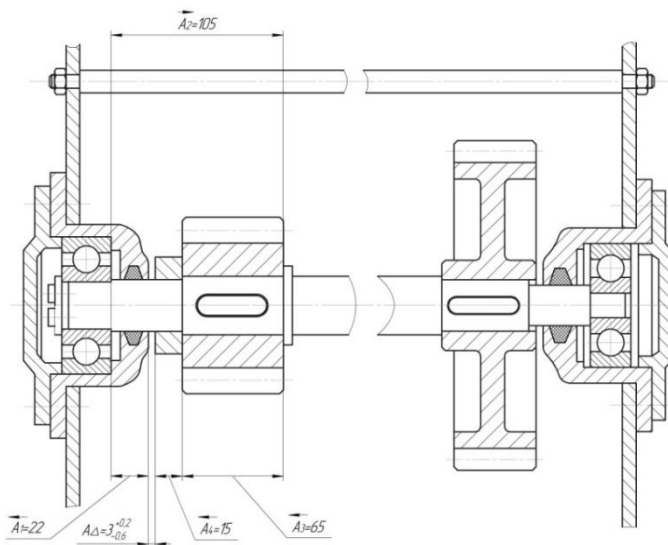


Рис. 5. Схема сборочной размерной цепи

Дано:

1. Замыкающее звено имеет допуск: $A_{\Delta} = 3_{-0,6}^{+0,2}$
2. Рассеивание действительных размеров всех звеньев подчиняется нормальному закону.
3. Процент риска выхода размеров замыкающего звена за границы допуска – $P = 0,25$ %.

Построим размерную цепь, т.е. найдем ее составляющие звенья. Делая обход по контуру от замыкающего звена, установим поверхно-

сти касания примыкающих деталей.

Запишем размерные связи следующим образом:

1. замыкающее звено – ширина стакана подшипника;
2. ширина стакана подшипника – участок вала;
3. участок вала – шестерня;
4. шестерня – распорная втулка;
5. распорная втулка – замыкающее звено.

В заданной размерной цепи замыкающим звеном является зазор, образуемый между торцом распорной втулки и поверхностью стакана подшипника. Этот зазор необходим для компенсации температурных изменений размеров деталей узла и, следовательно, величина его должна быть выдержана в строго заданных пределах.

Размерную цепь составят размеры между поверхностями касания каждой из указанных деталей:

$$A_1 = 22 \text{ мм}, A_2 = 105 \text{ мм}, A_3 = 65 \text{ мм}, A_4 = 15 \text{ мм}.$$

Следовательно, размерная цепь включает четыре составляющих звена, из которых звенья A_1, A_3, A_4 – являются *уменьшающимися*, а звено A_2 – *увеличивающим*.

Геометрическая схема размерной цепи представлена на рис 5.

Проверим правильность составления размерной цепи, для чего используем формулу:

$$A_{\Delta} = A_2 - (A_1 + A_3 + A_4),$$
$$A_{\Delta} = 105 - (22 + 65 + 15) = 3 \text{ мм}.$$

Полученное значение номинального размера замыкающего звена соответствует заданному. Следовательно, размерная цепь составлена правильно.

Определяем коэффициент точности размерной цепи, рассчитав предварительно допуск замыкающего звена:

$$T_{\Delta} = v_{\Delta} - n_{\Delta} = 200 - (-600) = 800 \text{ мкм}.$$

Определим коэффициент точности размерной цепи по формуле 37.

Так как по условию рассеивание действительных размеров звеньев подчиняется нормальному закону, принимаем $\lambda_i = 1/3$ и согласно принятому проценту риска $P = 0,25 \%$, значение коэффициента риска $t_{\Delta} = 3,1$ (табл. 1).

В знаменателе под знак суммы должны войти значения единиц допуска размеров звеньев $A_1, A_2, A_3, A_4, B_5, B_6, B_7$, которые находим по

прил. 1.

Тогда:

$$a_c = \sqrt{\frac{800^2}{3,1^2 \cdot (1/3)^2 \cdot (1,31^2 + 2,17^2 + 1,86^2 + 1,08^2)}} = 232,9 \text{ мкм.}$$

Сопоставляя полученное значение a_c с данными прил. 2, устанавливаем, что оно находится в интервале значений a_c , соответствующих 12-му и 13-му квалитетам ($a_{12} = 160$ мкм, $a_{13} = 250$ мкм).

В данном случае на составляющие звенья целесообразно назначить допуски по 12-му квалитету и, так как $a_c > a_{12}$, в качестве корректирующего звена выбрать наиболее сложное в изготовлении звено. Примем в качестве корректирующего звена участок вала – звено $A_2 = 105$ мм, а на остальные назначим стандартные допуски по прил. 3:

$$T_1 = 210 \text{ мкм}; T_3 = 300 \text{ мкм}; T_4 = 180 \text{ мкм.}$$

Нестандартный допуск корректирующего звена T_2 находим по формуле 15):

$$T_2 = \sqrt{\frac{800^2 - 3,1^2 \cdot (1/3)^2 \cdot (210^2 + 300^2 + 180^2)}{3,1^2 \cdot (1/3)^2}} = 662 \text{ мкм.}$$

Предельные отклонения составляющих звеньев (исключая корректирующее) назначаем, следуя вышеизложенному правилу.

$$A_1 = 22 \pm 0,105 \text{ мм}; A_3 = 65_{-0,3} \text{ мм}; A_4 = 15_{-0,18} \text{ мм.}$$

Определяем координату середины поля допуска корректирующего звена, определив предварительно ее значение у всех остальных звеньев цепи.

Координаты середины полей допусков замыкающего и составляющих звеньев находим по формуле (16):

$$c_\Delta = -0,2 \text{ мм}; c_1 = 0 \text{ мм}; c_3 = -0,15 \text{ мм}; c_4 = -0,09 \text{ мм.}$$

Координату середины поля допуска корректирующего звена находим по формуле (19):

$$c_2 = (0 - 0,15 - 0,09) + (-0,2) = -0,44 \text{ мм.}$$

Теперь по формуле (17) устанавливаем предельные отклонения звена A_2 :

$$B_2 = -0,44 + \frac{0,662}{2} = -0,109 \text{ мм},$$

$$H_2 = -0,44 - \frac{0,662}{2} = -0,771 \text{ мм}.$$

Таким образом корректирующее звено имеет предельные отклонения:

$$A_2 = 105_{-0,771}^{-0,109}$$

Производим проверку правильности расчета размерной цепи:

$$t_{\Delta} = \frac{T_{\Delta}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m+n} (\lambda_i^2 T_i^2)}} = \frac{800}{\sqrt{(1/3)^2 \cdot (210^2 + 662^2 + 300^2 + 180^2)}} = 3,1$$

Полученному значению коэффициента риска соответствует процент риска $P=0,25\%$, что равно заданному.

Значит, для заданной точности замыкающего звена назначенные по 12-му качеству допуски на размеры составляющих звеньев вполне приемлемы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Соломахо, В. Л. Нормирование точности и технические измерения : учеб. пособие / В. Л. Соломахо, Б. В. Цитович, С. С. Соколовский. – Минск : Изд-во Гревцова, 2011. – 360 с.
2. Путято, А. В. Расчет размерных цепей : учеб.-метод. пособие для студентов технических специальностей / А. В. Путято, А. В. Коваленко. – Гомель: БелГУТ, 2008. – 32 с.
3. Серый, И. С. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения : учебник / И. С. Серый. – Москва : Агропромиздат, 1987. – 368 с.
4. РД 50-635-87 «Методические указания. Цепи размерные. Основные понятия. Методы расчета линейных и угловых цепей». – Москва: Издательство стандартов, 1987. – 46 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Значение единицы допуска по РД 50-635-87

Интервалы диаметров, мм	до 3	св. 3 до 6	св. 6 до 10	св. 10 до 18	св. 18 до 30	св. 30 до 50	св. 50 до 80	св. 80 до 120	св. 120 до 180	св. 180 до 250	св. 250 до 315	св. 315 до 400	св. 400 до 500
	<i>i</i> , мкм	0,55	0,73	0,90	1,08	1,31	1,56	1,86	2,17	2,52	2,89	3,22	3,54

Приложение 2

Число единиц допуска по квалитетам по РД 50-635-87

№ квалитета	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
<i>a</i>	7	10	16	25	40	64	100	160	250	400	640	1000	1600

Приложение 3

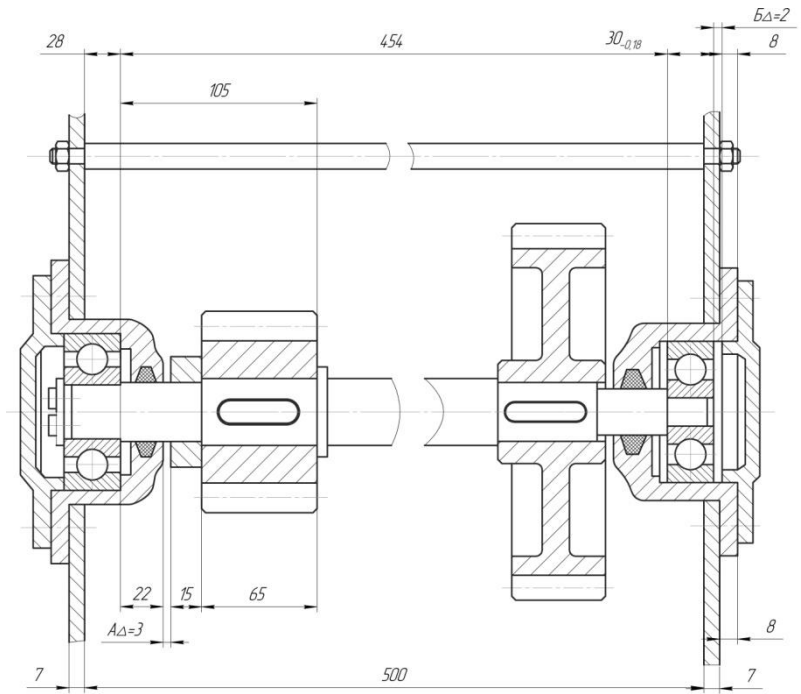
Число единиц допуска по квалитетам по РД 50-635-87

Интервалы номинальных размеров, мм	Значение допусков, мкм											
	Квалитеты											
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
до 3	4	6	10	14	25	40	60	100	140	250	400	600
св. 3 до 6	5	8	12	18	30	48	75	120	180	300	480	750
св. 6 до 10	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580	900
св. 10 до 18	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700	1100
св. 18 до 30	9	13	21	33	52	84	130	210	330	520	840	1300
св. 30 до 50	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1000	1600
св. 50 до 80	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1200	1900
св. 80 до 120	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1400	2200
св. 120 до 180	18	25	40	63	100	160	250	400	630	1000	1600	2500
св. 180 до 250	20	29	46	72	115	185	290	460	720	1150	1850	2900
св. 250 до 315	23	32	52	81	130	210	320	520	810	1300	2100	3200
св. 315 до 400	25	36	57	89	140	230	360	570	890	1400	2300	3600
св. 400 до 500	27	40	63	97	155	250	400	630	970	1550	2500	4000

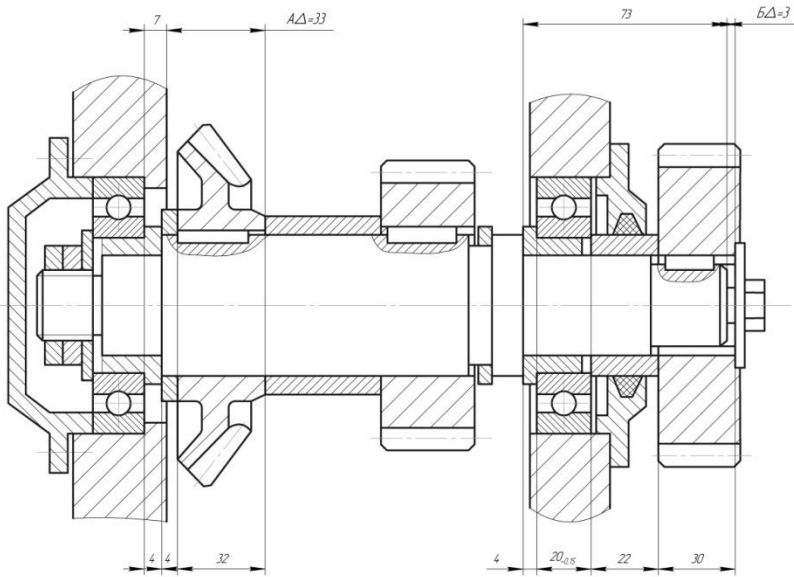
Исходные данные к расчету размерных цепей

№ варианта	Схема сборочного соединения (№ приложения)	Замыкающее звено, Δ	Метод расчета	Процент риска P, %
1	5	$A_{\Delta}=3_{-0,5}$	Полной взаимозаменяемости	-
2	5	$B_{\Delta}=2_{-1,0}^{+0,4}$	Вероятностный	0,5
3	5	$A_{\Delta}=3_{-0,2}^{+0,2}$	Полной взаимозаменяемости	-
4	5	$A_{\Delta}=3_{-0,6}^{+0,2}$	Полной взаимозаменяемости	-
5	5	$B_{\Delta}=2_{-1,7}^{-1,0}$	Вероятностный	0,05
6	5	$B_{\Delta}=2_{-1,95}^{-0,05}$	Полной взаимозаменяемости	-
7	6	$A_{\Delta}=33_{-0,3}^{+0,3}$	Полной взаимозаменяемости	-
8	6	$B_{\Delta}=3_{-0,62}$	Вероятностный	1,0
9	6	$B_{\Delta}=3_{-0,48}$	Полной взаимозаменяемости	-
10	6	$A_{\Delta}=33_{-0,52}$	Полной взаимозаменяемости	-
11	6	$B_{\Delta}=3_{-0,36}^{+0,36}$	Вероятностный	1,0
12	7	$A_{\Delta}=3_{-0,76}^{+0,76}$	Вероятностный	1,0
13	7	$B_{\Delta}=29_{-1,7}^{-1,1}$	Вероятностный	0,05
14	7	$A_{\Delta}=3_{-0,4}^{+0,4}$	Полной взаимозаменяемости	-
15	7	$B_{\Delta}=29_{-1,6}$	Полной взаимозаменяемости	-
16	7	$B_{\Delta}=29_{-1,0}$	Вероятностный	0,27
17	7	$A_{\Delta}=3_{-0,76}^{+0,76}$	Вероятностный	1,0
18	8	$A_{\Delta}=61_{-0,86}$	Полной взаимозаменяемости	-
19	8	$B_{\Delta}=3_{-0,3}^{+0,3}$	Вероятностный	0,1
20	8	$B_{\Delta}=3_{-0,4}^{+0,2}$	Полной взаимозаменяемости	-
21	8	$A_{\Delta}=61_{-0,4}$	Вероятностный	0,1
22	8	$B_{\Delta}=3_{-1,8}^{-0,2}$	Полной взаимозаменяемости	-
23	8	$A_{\Delta}=61_{-0,25}^{+0,25}$	Вероятностный	0,1

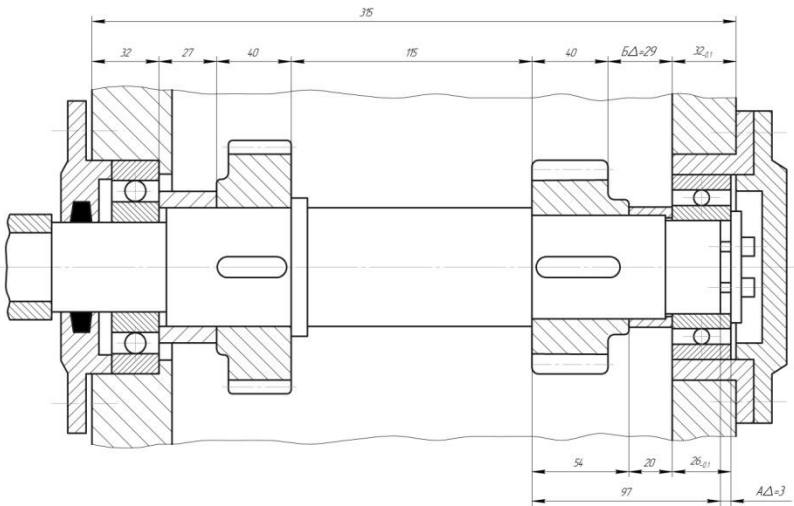
Приложение 5

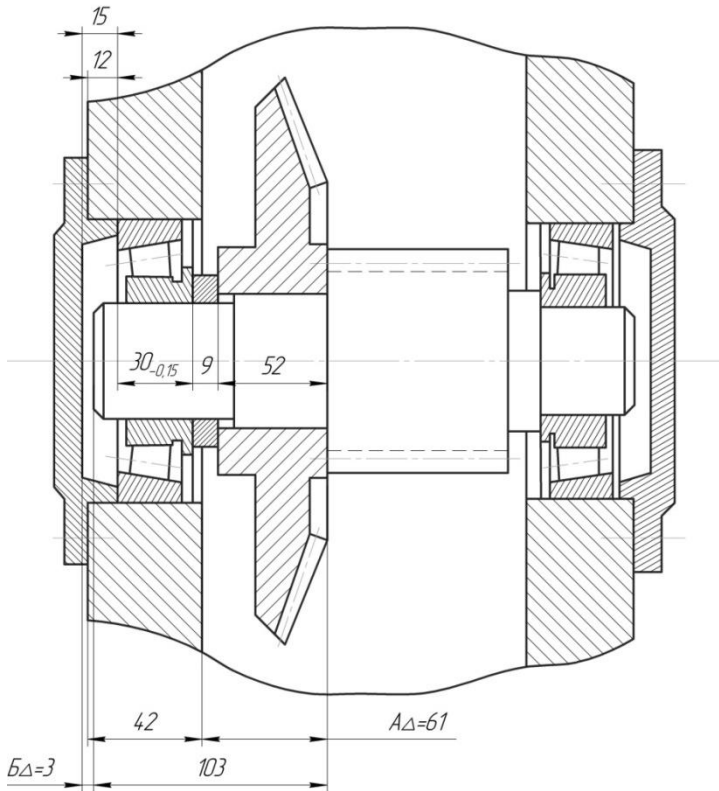


Приложение 6



Приложение 7





СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Общие сведения	3
1.1. Основные понятия, термины, определения и обозначения	3
1.2. Задачи, решаемые с помощью размерных цепей, и методы их расчета	6
2. Расчет линейных размерных цепей	7
2.1. Порядок расчета линейных размерных цепей методом полной взаимозаменяемости.....	7
2.2. Пример расчет линейных размерных цепей методом полной взаимозаменяемости.....	13
2.3. Порядок расчета линейных размерных цепей вероятностным методом	16
2.4. Пример расчет линейных размерных цепей вероятностным методом	23
Список использованных источников.....	26
Приложения	